

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS NO DOMÍNIO DA RESISTÊNCIA QUÂNTICA DE HALL

Godinho, M.I.A.; Ribeiro, L. F.; Nunes, M.C.

Laboratório de Medidas Eléctricas – LME

Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P.

Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa

RESUMO

É apresentada e descrita a definição da arquitectura do sistema de informação e de suporte lógico desenvolvido e implementado no LME-INETI, em linguagem de programação gráfica *LabView*, que possibilita a automatização do sistema experimental de Resistência Quântica de Hall, através do controlo da instrumentação associada, aquisição, processamento, tratamento estatístico e gestão de dados relativos a estudos comportamentais de amostras e de padrões convencionais.

Considerando a diversidade de instrumentação utilizada no sistema experimental de EQH, o elevado número de dados correspondentes à caracterização de amostras, a multiplicidade de parâmetros necessários à avaliação da sua quantificação e a necessidade de caracterizar o comportamento de padrões convencionais ao longo do tempo, tornou-se essencial o recurso a módulos aplicativos integrados.

Foram definidos algoritmos para o desenvolvimento e implementação de módulos aplicativos, de forma a automatizar os seguintes aspectos: Controlo e Aquisição da Dados, Processamento e Análise e Gestão de Dados.

ABSTRACT

An information system architecture and the logical support have been developed and implemented at LME-INETI, in a graphical programming language *LabView* allowing the functional automation of the Quantum Hall Resistance experimental system. The control of the associated instrumentation, acquisition, processing, statistical analysis and data management to characterize Hall devices and conventional standards is presented and described.

Considering the large amount of data involved in Hall samples characterization, the multiplicity of studies needed for its quantized behaviour and the necessity to describe conventional standards, is mandatory to file prearranged data for later processing according to specific goals.

Algorithms have been studied and three software modules have been developed and implemented, to guarantee functional requirements allowing the automation of the following: Control and Data Acquisition, Data Processing and Analysis and Data Management

1. Introdução

Em 2005 foi implementado no INETI-LME um sistema de resistência quântica de Hall para a materialização do 'ohm' e manutenção de um padrão primário de resistência [1]. Este sistema, controlado por computador via interface IEEE, é constituído essencialmente por três blocos: Criogenia (baseado num crióstato de hélio-4, magneto supercondutor 12 - 14 T e amostras), Sistema de Controlo e Medição (controlador de temperatura, fonte de alimentação do magneto, medidor de nível de hélio, fonte de corrente e voltímetros digitais de elevada exactidão) e Sistema de Alto Vácuo (bombas rotatória e turbo-molecular e respectivos medidores).

O Efeito de Hall Quântico (EQH), descoberto em 1980 por Klaus von Klitzing [2], é observado em amostras de semicondutores nas quais os electrões portadores de corrente se encontram confinados no interior de uma camada gasosa bidimensional (2DEG), quando submetidas a campos magnéticos intensos (alguns tesla) e arrefecidas a temperaturas da ordem de 1 K. Nestas condições, representando graficamente a variação com o campo magnético das diferenças de potencial medidas longitudinal e transversalmente numa amostra de Hall, quando esta é percorrida longitudinalmente por uma corrente constante, verifica-se a existência de intervalos de campo

magnético, em que a primeira se reduz para valores próximos de zero, enquanto a segunda se mantém constante. Nestes intervalos de campo magnético, em que o valor da resistência de Hall se mantém constante, designados patamares de Hall, observa-se a seguinte relação:

$$R_H(i) = \frac{R_K}{i} = \frac{h}{ie^2} \quad [1]$$

sendo R_K a constante von Klitzing, i um número inteiro característico da identificação do patamar, h a constante de Planck e e a carga elementar. Da relação anterior, obtém-se que R_K é igual ao valor da resistência quantificada, correspondente ao patamar $i = 1$, $R_H(1) = h/e^2$.

$R_{K-90} \approx 25\,812,807 \pm 0,005 \, \Omega$, foi o valor da constante von Klitzing que se convencionou utilizar por todos os NMI's a partir de 1 de Janeiro de 1990. Desde então que a representação do 'ohm' é assim, baseada, assegurando a rastreabilidade do valor quantificado das amostras de Hall.

Estas amostras são pois consideradas padrões intrínsecos, constituindo referências muito estáveis e reprodutíveis, dado que dependem apenas de constantes fundamentais, e não de artefactos.

Tem sido prática corrente no INETI-LME, tal como acontece na maioria dos laboratórios metrológicos, o desenvolvimento e a implementação de aplicações dedicadas [3, 4 e 5], permitindo, entre outros aspectos, uma grande flexibilidade de operações (aquisição, medição, tratamento, processamento e gestão de dados), maior e melhor avaliação metrológica das capacidades de medição e a sua adequação aos vários domínios de actividade. Por fim, a representação gráfica efectuada em simultâneo possibilita uma percepção imediata do comportamento dos parâmetros em estudo.

Considerando a diversidade de instrumentação utilizada no sistema experimental de EHQ, o elevado número de dados correspondentes à caracterização de amostras, a multiplicidade de parâmetros necessários à avaliação da sua quantificação e a necessidade de caracterizar o comportamento de padrões convencionais ao longo do tempo, torna-se essencial o recurso a módulos aplicativos integrados, que permitam, numa primeira fase, guardar grandes conjuntos de dados e, mais tarde, recolhê-los selectivamente de acordo com objectivos específicos, tais como, tipos de amostras, parâmetros críticos do estudo efectuado, datas de medição, valor nominal ou designação de resistências-padrão, etc.

Deste modo, foram definidos alguns algoritmos, em ambiente *LabView*, para o desenvolvimento e implementação de módulos aplicativos, de forma a automatizar os seguintes aspectos:

- Controlo e Aquisição da Dados: controlo, parametrização e determinação de valores associados a toda a instrumentação envolvida na caracterização de amostras, permitindo a visualização gráfica, validação e respectivo registo;
- Processamento e Análise: estudo e avaliação de desempenho de amostras de Hall com diversos parâmetros críticos, determinação da exactidão do valor quantificado do patamar e gravação de dados correspondente ao respectivo tratamento estatístico;
- Gestão de Dados: selecção de conjuntos de registos de medidas e valores de calibração de padrões convencionais ou tipos de amostras, permitindo seleccionar dados correspondentes a intervalos de tempo definidos, eliminar valores *outliers*, aplicar ajustes lineares e estimar valores de resistências-padrão e respectivas incertezas expandidas em função do tempo.

2. Controlo e Aquisição de Dados

O módulo implementado para efectuar o controlo de instrumentação e aquisição de dados, cujo painel frontal se apresenta na figura 1, para além de parametrizar cada um dos equipamentos utilizados, definindo parâmetros e gamas de medição, determina a média de n leituras associadas à intensidade de corrente que percorre a amostra, temperatura, campo magnético e diferenças de potencial transversal e longitudinal (V_H e V_{xx}).

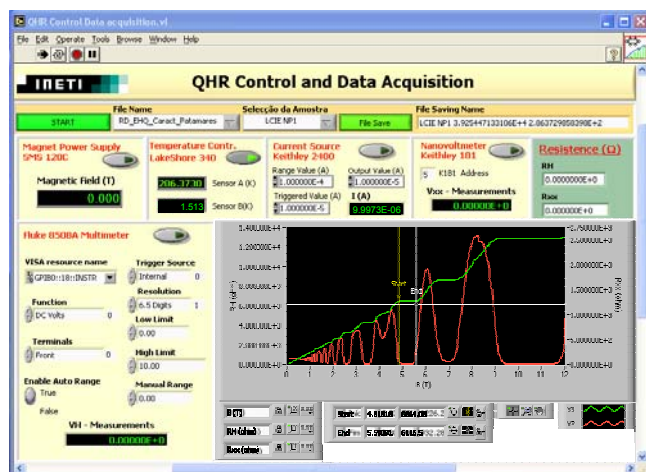


Figura 1 – Painel frontal do módulo de controlo de instrumentação e aquisição de dados.

Posteriormente, determina os valores da resistência de Hall, R_H , e da resistência eléctrica da amostra, R_{xx} , considerando as respectivas diferenças de potencial e o valor da corrente que a percorre. Este algoritmo permite determinar as características eléctricas globais de uma amostra, localizando os respectivos patamares em função da intensidade e polaridade de campo magnético, valor de corrente e temperatura. Os valores de R_H e R_{xx} são representados graficamente em função dos parâmetros medidos.

Para uma análise mais detalhada e processamento posterior, todas as medidas efectuadas pelo sistema são gravadas numa única tabela, em ficheiro tipo texto e formato predefinido, tal como apresentado na figura 2.

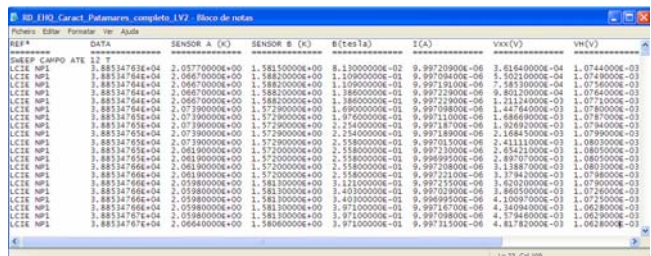


Figura 2 – Ficheiro de Dados.

3. Processamento e Análise

O conhecimento e avaliação das propriedades das amostras de Hall são cruciais para a sua utilização como referência na calibração de resistências-padrão.

A qualidade de uma amostra é avaliada considerando vários aspectos do seu comportamento, tais como:

- largura, estabilidade e quantificação dos seus patamares;
- dependência com a temperatura, corrente e intensidade de polaridade de campo magnético.

A avaliação do valor de R_{xx} em regime de EHQ (estado não dissipativo $\Rightarrow R_{xx} = 0$) e o desvio de R_H do seu valor quantificado aumenta gradualmente com o aumento do valor da temperatura e da intensidade de corrente. Quando esta excede um determinado valor crítico, R_{xx} aumenta subitamente várias ordens de grandeza, revelando uma quantificação imperfeita.

Na figura 3 encontra-se representado o painel frontal correspondente ao módulo implementado para o processamento e análise de dados.

Esta aplicação efectua a caracterização de amostras de Hall com diversos parâmetros críticos, determinando a exactidão do valor quantificado do patamar, ausência de dissipação, estabilidade e dependência com o campo magnético, a corrente e a temperatura de R_H e R_{xx} , visualizando graficamente os estudos efectuados e gravando os dados correspondentes ao respectivo tratamento estatístico, em folhas de cálculo de formato predefinido.



Figura 3 – Painel frontal do módulo de análise e processamento de dados.

Após selecção e acesso ao ficheiro pretendido, a aplicação desenvolvida permite, numa primeira fase, seleccionar, entre um vasto conjunto de registos de medidas, subconjuntos de dados, através da escolha da designação da amostra, valor de corrente nominal e intervalos entre datas (parte superior esquerda da figura 3). Pela observação dos valores seleccionados, visualizados sob a forma de tabela, e de acordo com a escolha, por recurso a “caixas de texto”

(esquemáticamente apresentadas na figura 4), dos parâmetros a utilizar no estudo pretendido, correspondentes a dois eixos Y (Y_1 e Y_2), tais como, grupo data/hora, valores de temperatura (sensores A e B), campo magnético, valor nominal de intensidade de corrente, diferenças de potencial transversal ou longitudinal (V_H ou V_{xx}), resistência de Hall ou resistência eléctrica da amostra é possível eliminar valores *outliers* de acordo com a regra de 3σ .

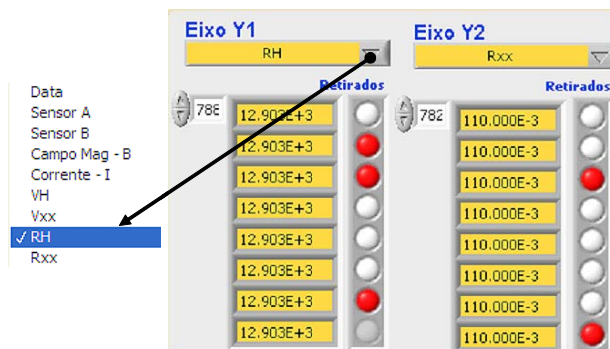


Figura 4 – Utilização de “caixas de texto” para a eliminação de valores *outliers*.

Os dados seleccionados e correspondentes ao estudo pretendido são visualizados sob forma gráfica, permitindo, através da utilização de cursores móveis, a escolha de novos intervalos para os eixos X e Y, relativamente aos quais é calculado o valor médio e o desvio-padrão experimental da média.

Na figura 3 é apresentado, como exemplo, um estudo de exactidão e quantificação do patamar $i=2$ ($R_H = 12\,906,912\ \Omega$), considerando um intervalo de campo magnético entre 9,8 T e 11,0 T e um valor médio de temperatura de 1,5 K.

Os valores resultantes do estudo efectuado, assim como, a identificação da amostra e uma breve descrição do mesmo, valores identificativos dos intervalos X e Y considerados, número total de pontos, valores médios e desvios-padrão experimentais, são gravados em folhas de cálculo para posterior utilização sob a forma de base de dados.

4. Gestão de Dados

A aplicação implementada engloba dois algoritmos distintos, um para a gestão de dados correspondentes a estudos de caracterização de amostras de Hall e outro para valores de calibração de resistências-padrão convencionais. A selecção dos algoritmos é efectuada através da uma escolha do tipo “janela”.

Estes algoritmos permitem manipular grandes quantidades de dados, questionar as respectivas bases de dados sob um determinado padrão (amostra de Hall ou resistência-padrão) ou data de medição/calibração. Possibilitam também a aplicação de ajustes polinomiais ao conjunto de dados

seleccionado, utilizando o método dos mínimos quadrados.

O algoritmo referente à base de dados de resistências-padrão efectua estimativas dos seus valores e respectivas incertezas expandidas, tendo como base os modelos teóricos definidos.

4.1 Amostras de Hall

O algoritmo, cujo painel frontal se apresenta na figura 5, é utilizado para a gestão de dados correspondentes a estudos de caracterização de amostras de Hall.

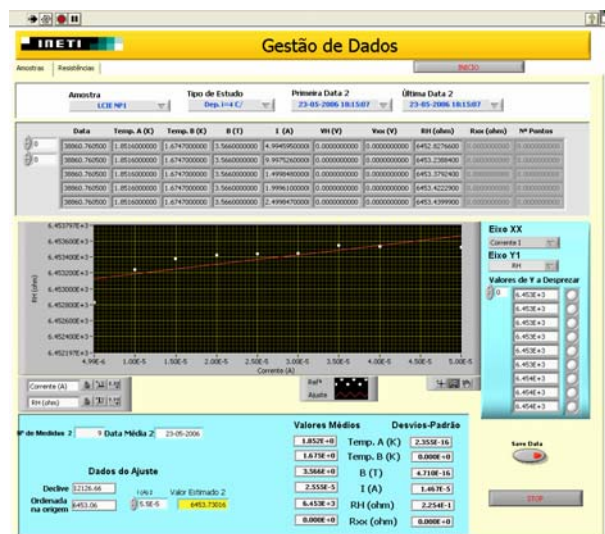


Figura 5 – Painel frontal do módulo para a gestão de dados de resistências-padrão.

A sequência de operações efectuadas pelo algoritmo implementado podem sintetizar-se de acordo com os seguintes aspectos:

- selecção da amostra, através da sua designação;
- escolha do tipo de estudo em análise e do intervalo de tempo pretendido;
- visualização dos valores correspondentes à selecção efectuada, quer sob a forma de tabela quer graficamente;
- possibilidade de eliminar valores *outliers* ao conjunto seleccionado e aplicação de ajuste polinomial;
- determinação de valores médios e desvios-padrão experimentais da média.

Na figura 5 é apresentado, como exemplo, o conjunto de dados relativo ao estudo de uma amostra de Hall com a corrente de medição.

Os valores determinados possibilitam assim, em futuras utilizações dessa mesma amostra, uma transferência mais rápida dos valores quantificados

para resistências-padrão, independentemente do método de calibração utilizado.

4.2 Resistências-Padrão

O algoritmo desenvolvido para a gestão de dados correspondentes a valores de calibração de resistências-padrão (cujo painel frontal se apresenta na figura 6), pretende funcionar como uma base de dados que, para além de coligir toda a informação referente ao histórico quer de padrões próprios quer de clientes, permita também ser um meio de fácil acesso a qualquer valor de um padrão entre um largo conjunto de registos de medidas, efectuados ao longo de vários anos e de acordo com determinados parâmetros de influência, tais como, tensão, corrente ou temperatura de medição.

A selecção é efectuada através da identificação do padrão, pelo seu número de série e valor nominal, e escolha de intervalos de intervalos de tempo (parte superior da figura 6). Os dados seleccionados, correspondentes a um dado padrão, são visualizados sob a forma de uma tabela e graficamente representados, em valor absoluto ou relativo, em função do tempo, da temperatura, da corrente ou da tensão de medição, sendo a escolha do parâmetro respectivo efectuada por recurso a "caixas de texto" (tais como as apresentadas na figura 3).

Considerando a realização de estudos de deriva e pela observação dos valores representados ou de acordo com a regra de 3σ é possível eliminar as medidas que se considerem *outliers* (parte central inferior da figura 6).



Figura 6 – Painel frontal do módulo para a gestão de dados de resistências-padrão.

Ao conjunto de medidas seleccionado é aplicado um ajuste polinomial e, de acordo com a respectiva equação, é estimado o seu valor para uma determinada data e calculada a respectiva incerteza expandida. Esta é avaliada considerando, como componentes principais no respectivo balanço de incerteza, um majorante, correspondente aos valores

de incerteza determinados na medição, e o desvio-padrão experimental da média dos valores do estudo efectuado. É ainda determinada a data média, o número total de medidas, o valor médio e o desvio-padrão experimental da média do conjunto. A representação gráfica das medidas em função da temperatura, tensão e corrente, permite determinar os respectivos coeficientes e factores de potência.

Na figura 6 é apresentado, como exemplo, o estudo de deriva de uma resistência-padrão de valor nominal 10 k Ω , tipo ESI-SR104 com medidas correspondentes ao um período aproximado de 13 anos.

5. Conclusões

O desenvolvimento e a implementação dos algoritmos apresentados, aliados à versatilidade e funcionalidades do *LabView*, nomeadamente, no que se refere à sua capacidade de comunicação e aquisição de dados e à existência de uma grande multiplicidade de “*instrumentos virtuais*”, dedicados a funcionalidades de tratamento estatístico e processamento de dados, permitiu automatizar o sistema experimental de efeito de Hall quântico instalado no LME e, por outro lado, criar uma ferramenta para a gestão de grandes conjuntos de dados, correspondente ao estudo de amostras de Hall, e organizar sob a forma de base de dados, toda a informação relativa a resistências-padrão convencionais pertencentes ao laboratório e aos seus clientes.

Estas bases de dados, além de constituírem um meio de acesso fácil a qualquer registo tabelado, possibilitam a realização de estudos a longo prazo, avaliando e prevendo estatisticamente os respectivos valores e incertezas, garantindo uma maior qualidade e fiabilidade dos dados obtidos e disseminados.

REFERÊNCIAS

- [1] Godinho, I., Nunes, M., "Implementação de Um Padrão Primário de Resistência Baseado no Efeito de Hall Quântico", 1ª Conferência Nacional "Medir Mais e Melhor", SPMet, Lisboa, 28-29 de Novembro de 2005.
- [2] Klitzing, Klaus von; "25 Years of Quantum Hall Effect: A Personal View on the Discovery, Physics and Applications of this Quantum Effect", Séminaire Poincaré 2, 1-16, 2004.
- [3] Ribeiro, L. F.; Godinho, M. I. A.; Cabral, A.; Oliveira, V.; Nunes, M.C.; Rebordão, J. M.; "Aplicações Desenvolvidas no Âmbito da Metrologia Eléctrica e de Vibração no INETI", Fórum Tecnológico da Instrumentação, Teste, Medida e Controlo Industrial - NIDays 2007, organizado pela National Instruments Portugal, Centro de Congressos do Taguspark — Oeiras, 12 de Abril 2007.

- [4] Godinho, M. I.; Nunes, M.; Cabral, A.; Rebordão, J. M., Oliveira, V.; "Absolute Calibration of Standard Accelerometers with Optical Interferometry" - 7th Intl Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Italy, 19 - 22 June 2006.
- [5] Ribeiro, L., Godinho, M., Nunes, M.; "Automação em Metrologia Eléctrica - O Exemplo do Laboratório Primário Português"; 5º Seminário Internacional de Metrologia Eléctrica, T-04, V Semetro, INMETRO, Rio de Janeiro; Abril 10-12 2002.